

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18395

研究課題名（和文）左心室内3次元血流ベクトルの超高時間分解能超音波計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of an ultrasonic measurement system with high temporal resolution for an estimation of three-dimensional blood flow velocity vectors in a left ventricle of heart

研究代表者

長岡 亮（Nagaoka, Ryo）

富山大学・学術研究部工学系・助教

研究者番号：60781648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：心疾患を未然に防ぐためには、全身に血液を送り出すポンプの役割を果たしている心臓の機能を定量的に評価する必要がある。心臓内の血流ダイナミクスは非常に重要な情報を有している。特に、左心室内の血流情報と心疾患の間には密接な関係があることが知られている。本研究では、左心室内3次元血流ベクトルの高時間分解能計測を実現するために、1.5D超音波アレイプローブの設計および開発を行うことを目的とした。また、血流速度ベクトル推定法を提案し、シミュレーション実験およびin vivo実験によって提案手法を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1.5D超音波アレイプローブの使用と広く普及している超音波診断装置のソフトウェアを改良することによって、臨床の現場でも左心室内の血流速度ベクトル情報を高時間分解能で計測可能となり、国民の生活の質の向上にも大いに貢献することが期待出来る。さらに、本研究は血流だけではなく、血管壁や心臓壁のダイナミクス解明にも応用可能であり、それらの動態も定量的に評価可能となることが期待出来る。

研究成果の概要（英文）：To prevent heart failure, a function of heart playing a role as a pump, which sends blood to whole body, is needed to be evaluated quantitatively and the blood flow dynamics include much more important information for diagnosis. Especially, it's known that the flow information in the left ventricle of heart is closely related to the heart failure. In this study, we designed and developed a 1.5-D ultrasonic array probe to achieve measurement of three-dimensional blood flow velocity vectors in the left ventricle. Also, we proposed an estimation method of the blood flow velocity vectors and evaluated it by performing simulation and in vivo experiments.

研究分野：超音波計測

キーワード：超音波計測 血流情報 高時間分解能

1. 研究開始当初の背景

全身に血液を送り出すポンプの役割を果たしている心臓に関わる心疾患は、日本の死因の15.5%もの割合を占めており、死因の第2位である。この心疾患を未然に防ぐためには、心臓の機能を定量的に評価する必要があるが、心臓内の血流ダイナミクスは非常に重要な情報を有している。特に、左心室の血流情報と心疾患との間には密接な関係があることが知られている。例えば、拡張期から収縮期に左心室内に流れる血流やその際に発生する渦と左心室壁の動態との関係性から心機能(特に、左心室に関して)の評価が可能である。

左心室の血流評価方法としては、ドプラ効果を用いた超音波ドプラ法(時間分解能: 秒間30枚程度の断層像を撮像可能)が臨床の現場で最も広く用いられているが、血流速度情報が照射した超音波ビームに沿った情報しか得られないという問題がある。この問題を解決するために、通常のフォーカスした超音波ビームではなく、広い領域に広がる拡散波を用いた高時間分解能超音波計測法を応用し、異なる角度で拡散波を照射し、それぞれで推定された血流速度情報から任意断面において2次元血流ベクトルを推定する手法を提案した。本提案手法を用いることで左心室内の急速な血流変化や微細な血流情報を高時間分解能(図1. 時間分解能: 秒間1000-2000枚程度の断層像を撮像可能)で評価することが可能になった。

しかしながら、左心室内血流が本来は3次元の流れであるため、3次元的に血流計測をすることが可能となれば、より定量的に心機能の評価することが可能であると考えられる。加えて、医療従事者の診断技術によって、計測される心臓の計測断面・位置が異なり、診断結果に影響を及ぼす可能性も考えられる。以上の理由より、3次元血流ベクトルの推定手法の確立が望まれている。

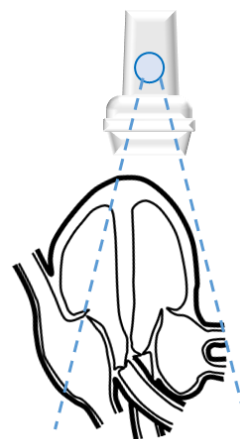


図1. 拡散波を用いた高時間分解能超音波計測法

2. 研究の目的

本研究の目的は、左心室内3次元血流ベクトルの高時間分解能計測を実現するために、1.5D超音波アレイプローブの設計および開発を行うことである。現在、臨床の現場において、3次元超音波画像を得るために、超音波素子を2次元的に配置した2D超音波プローブが用いられている。しかしながら、素子数の合計が数千個と非常に多くなっている。本研究では、一方向には超音波素子を十分に配列し、それと直交する方向には粗く配列した1.5D超音波プローブを用いた手法の開発を行う。この1.5D超音波プローブを用いることで、素子数を256個程度まで削減できるために、広く普及している超音波診断装置のソフトウェアの改良のみで臨床の現場でも使用することが可能になることを期待している。本研究は、血流評価だけではなく、心筋のダイナミクス解析にも応用可能であり、心臓壁や弁の動態評価も可能となることを期待できる。

3. 研究の方法

本研究の主な研究課題は以下の3点である。

(1) 1.5D超音波アレイプローブの開発

臨床の現場における2Dアレイプローブを用いた計測では、1心拍中に計測領域全体の3次元データを取得することは困難であるために、心電図等との同期が行われており、異なる心拍中で計測を行うために、心臓の動きを補正する必要がある。また、素子数が数千個程度にもなるために、計測システムも大規模な専用機器が必要となり、コストも従来のシステムと比較すると高額になってしまう。

本研究では、それらの問題を解決するために、一般的な超音波診断装置でも使用可能であるような1.5D超音波アレイプローブを開発し、3次元血流ベクトルを推定することを目指す。本検討では、空間分解能、信号対雑音比(SNR)、速度推定精度等の観点からシミュレーションを実施し、1.5D超音波アレイプローブの仕様を決定する。実際の評価には、256chの超音波データを送受信可能な超音波送受信システムを用いる。

(2) 複数角度方向からの拡散波を用いた高時間分解能2次元血流推定法の検討

高時間分解能2次元血流推定法としては、頸動脈血流を計測対象として、1次元のリニアプローブと平行波を用いた手法が報告されている(J. Udesen, et al., IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control, 55, pp. 1729-1743, 2008.)。しかしながら、心臓が頸動脈よりも深い位置にあるために、頸動脈の計測に使用するリニアプローブよりも低周波数のセクタプローブを用いる必要がある。さらに、セクタプローブの開口幅の大きさが限られているために、2次元血流推定可能範囲が限られる問題が生じる。

そこで、任意の計測断面における2次元血流ベクトルを推定するために、同じ計測断面において、2つの異なる角度から拡散波を照射し、それぞれの場合で得られた速度情報とその幾何学的関係から2次元血流ベクトルを推定する。

(3) 複数断面の2次元血流ベクトルと流体力学法則による3次元血流ベクトル推定法の検討
第一に、1.5D超音波アレイプローブを用いて、同時刻に複数計測断面における2次元血流ベクトル分布を推定する。この際に、連続する複数断面に着目し、推定した2次元血流ベクトルと連続の式とを用いることで、断面に垂直な速度成分を推定することを目指す。

4. 研究成果

(1) 1.5D超音波アレイプローブのシミュレーション実験による開発

通常の超音波診断装置でも使用可能である1.5D超音波アレイプローブをシミュレーション実験によって得られた結果を基に設計を行った。通常の超音波診断装置での使用を目的とするために、素子数の合計は256chとした。Field IIソフトウェア(J. A. Jensen and N. B. Svendsen, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control, 39, pp. 262-267, 1992. J. A. Jensen, Med. Biol. Eng. Comput, 34, pp. 351-353, 1996.)を用いてシミュレーション実験を実施し、空間分解能, SNR, 血流速度推定精度等の観点から評価を行った。シミュレーション実験の結果, 中心周波数3.0 MHz, 超音波素子サイズ0.5 mm×0.5 mmを32ch×8chの2次元配置に配列した。また, 実際に設計した1.5D超音波アレイプローブを用いて, 空間分解能・SNR等の評価を行った。結果として, 実測結果とシミュレーション結果とが近いことを確認した。

(2) 血流速度ベクトルの推定手法に関する検討結果

2次元血流速度ベクトル推定法に関しては、異なる2つの角度から拡散波を用いた手法(ベクトルドブラ法), スペックルトラッキング法, ベクトルフローマッピング法の3手法に関して、左心室内に生じる渦流れを模擬したシミュレーション実験を実施し、推定精度に関して評価を行った。このシミュレーション実験にも、Field IIソフトウェアを用いた。そのシミュレーション実験結果から得られた速度推定結果およびフレームレートの観点からスペックルトラッキング法およびベクトルフローマッピング法の2つの手法を候補手法として決定した。図2はベクトルドブラ法の推定精度をField IIを用いたシミュレーション実験によって検証した結果である。この検証では、左心室内に発生する渦流れを模擬し、推定された速度ベクトルの大きさと真値とのバイアスエラーを評価した。さらに、上記のスペックルトラッキング法およびベクトルフローマッピング法を実際のヒト左心室計測によって得られた計測データに適用し、任意断面における2次元血流速度ベクトルが推定可能であることを確認した。図3は2次元血流速度ベクトル推定結果の1例である。図3の左図が左心室の超音波断層像、右図が2次元血流速度ベクトルの推定結果である。矢印の方向は速度ベクトルの方向、矢印の長さとは色は速度ベクトルの大きさを表し、右図から左心室内で発生する渦流れを確認することが出来た。

次に1.5D超音波アレイプローブを用いて3次元速度推定手法の評価を行った。本評価には、生体を模擬したファントムを自動ステージによって3次元的に移動させた際に、3次元速度推定手法によって算出した速度ベクトルとステージの移動速度(真値)との比較を行った。3次元的に速度推定を行うことで、従来の2次元速度推定手法を用いて推定した結果と比較すると、推定値のばらつきが抑制されることを確認した。さらに、Field IIソフトウェアを用いたシミュレーションでも、3

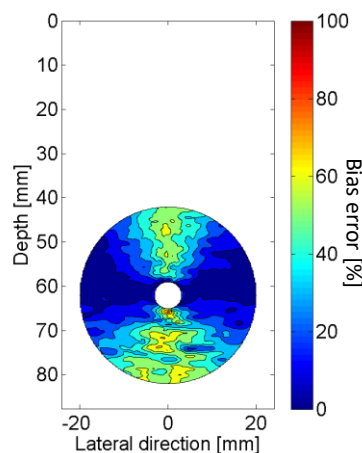


図2. ベクトルドブラ法を用いたシミュレーション実験結果

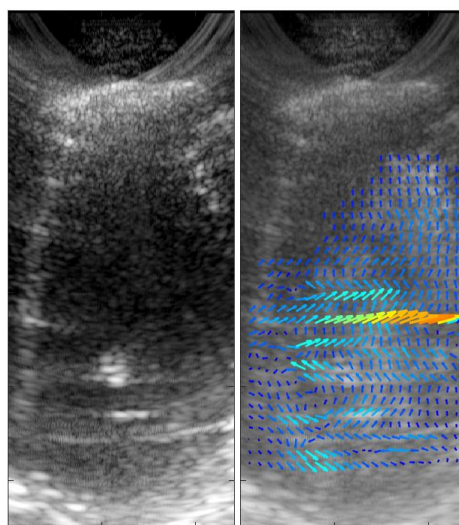


図3. 2次元血流速度ベクトル推定結果
(左) 左心室の超音波断層像,
(右) 2次元血流速度ベクトル

次元速度推定に関する精度検証を行い、速度ベクトルの真値と比較を行った。また、左心室内の3次元流れを流体解析シミュレーションによって推定することで、よりヒト左心室内の血流動態に近い流れを再現した。

(3) 追加の検討事項

以下の2点に関して追加で検討を行った。

1点目は、壁にどの程度の応力が加わっているかを示す Wall shear stress (WSS) に関する検討である。血流速度ベクトル推定法をさらに発展させることで WSS の推定手法も確立した。この提案手法では、血流速度プロファイルの空間的な変曲点に着目しており、従来の推定手法よりもより安定的に推定することが可能である。この WSS に関する情報と血流動態に関する情報とを組み合わせることによって、いままではわかりえなかった心機能の新たな情報も取得出来ることが期待され、心機能をより詳細に評価することが可能であると考えられる。

2点目は、心臓の弁等からの超音波反射信号による影響に関する検討である。血流速度ベクトルを高精度に推定するためには、血流からの超音波反射信号と心臓壁や弁からの反射信号とを分離する必要があるのだが、特に高速で移動する心臓の弁からの反射信号を分離することが困難であることがわかった。これは、分離の際に時空間的な変化と反射信号の強度に基づいて分離を行っており、血流からの反射信号と心臓の弁からの反射信号の時間的な特徴が類似しているためであると考えられる。この問題を解決するために、空間的にこれらの信号を分離する手法に関して検討を行った。当初検討していた手法では、超音波計測時に超音波を広範囲に照射することで空間的に多くの情報を取得していた。しかしながら、そのために血流からの反射信号と心臓の弁等からの反射信号も同時に計測しており、前述した問題が生じたと考えられる。そこで、1秒間に撮像可能な画像の枚数であるフレームレートは減少してしまうが、送信する超音波を空間的にコントロールすることで問題の解決を目指した。この検討のために、ファントム実験を実施した。この際に、画像再構築に用いる仮定音速の影響についても検討を行った。結果として、仮定音速と送信超音波の空間分布をコントロールすることで、画像の質であるコントラストが改善することを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryo Nagaoka, Shin Yoshizawa, Shin-ichiro Umemura, Hideyuki Hasegawa	4. 巻 60
2. 論文標題 Effects from correction of speed of sound in transmit and receive beamforming using focus beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDE19-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abf55b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryo Nagaoka, Kazuma Ishikawa, Michiya Mozumi, Magnus Cinthio, Hideyuki Hasegawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Basic study on estimation method of wall shear stress in common carotid artery using blood flow imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKE16-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab87f2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ryo Nagaoka, Hideyuki Hasegawa	4. 巻 47
2. 論文標題 Modified high-resolution wavenumber analysis for detection of pulse wave velocity using coefficient of variation of arterial wall acceleration waveforms.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 167-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10396-019-00998-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryo Nagaoka, Hideyuki Hasegawa	4. 巻 46
2. 論文標題 Identification of vascular lumen by singular value decomposition filtering on blood flow velocity distribution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 187 ~ 194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10396-019-00928-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Nagaoka, Michiya Mozumi, Hideyuki Hasegawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Investigation on estimation accuracy of 2-Step block matching methods using envelope and RF signals for 2-D blood	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGE10-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab0ffa	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michiya Mozumi, Ryo Nagaoka, Hideyuki Hasegawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Utilization of singular value decomposition in high-frame-rate cardiac blood flow imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGE02-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Ryo Nagaoka, Benjamin Meirza, Maria Evertsson, Magnus Cinthio, Hideyuki Hasegawa
2. 発表標題 Visualization of micro flow channel by plane wave imaging and temporal variance
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 特異値分解および時間的分散を用いた微小血管の可視化に関する基礎検討
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 Ryo Nagaoka, Shin Yoshizawa, Shin-ichiro Umemura, Hideyuki Hasegawa
2. 発表標題 Basic study on correction of speed of sound in forming of non-cylindrical focus beam
3. 学会等名 The 41st Symposium on Ultrasonic Electronics
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Ryo Nagaoka, Michiya Mozumi, and Hideyuki Hasegawa
2. 発表標題 Visualization of blood flow velocity vectors in human heart using high frame rate ultrasound imaging and vector flow mapping
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 茂澄倫也, 長谷川英之
2. 発表標題 超高分解能ベクトルフローマッピング法による心臓内血流ダイナミクスと2次元速度情報の評価
3. 学会等名 第13回血流会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Ryo Nagaoka, Kazuma Ishikawa, Michiya Mozumi, Magnus Cinthio, and Hideyuki Hasegawa
2. 発表標題 Basic study on estimation method of shear stress in carotid artery using blood flow imaging
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 茂澄倫也, 石川数馬, 長谷川英之
2. 発表標題 超高速超音波断層法による左心室内血流動態の可視化
3. 学会等名 日本超音波医学会第40回中部地方会学術集会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 大村眞朗, 山口 匡, 長谷川英之
2. 発表標題 高時間分解能超音波イメージングを用いた血球の粒子サイズと圧力との関係に関する基礎検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 茂澄倫也, 長谷川英之
2. 発表標題 超高速超音波断層法による心臓内血流ダイナミクスと流速ベクトルの可視化
3. 学会等名 日本超音波医学会第92回学術集会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 特異値分解を用いた頸動脈内腔領域抽出
3. 学会等名 日本超音波医学会第92回学術集会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 脈派の反射波成分の検出に関する基礎検討
3. 学会等名 日本超音波医学会第92回学術集会
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 脈波伝搬速度検出のための超音波照射シーケンスに関する基礎検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茂澄倫也, 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 特異値分解を用いたカラードプラ画像の正則化
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nagaoka, Michiya Mozumi, and Hideyuki Hasegawa
2. 発表標題 2-D blood flow vector imaging in common carotid artery based on 2-step block matching method using envelope and RF signals
3. 学会等名 The 39th Symposium on Ultrasonic Electronics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Michiya Mozumi, Ryo Nagaoka, and Hideyuki Hasegawa
2. 発表標題 Singular value decomposition of element echo signal received by individual elements for clutter reduction
3. 学会等名 The 39th Symposium on Ultrasonic Electronics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長岡 亮, 吉澤 晋, 梅村晋一郎, 長谷川英之
2. 発表標題 ベクトルドブラ法における血流速度推定に用いる超音波ビーム角度に関する基礎検討
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 シミュレーションファントムを用いたブロックマッチング法とベクトルドブラ法との血流速度推定精度比較に関する基礎検討
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 回転ファントムを用いた2次元血流速度推定法に関する基礎検討
3. 学会等名 日本超音波医学会基礎技術研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長岡 亮, 長谷川英之
2. 発表標題 高時間分解能超音波計測法におけるスペックルトラッキングの推定精度検証
3. 学会等名 電子情報通信学会/音響学会 超音波研究会, 日本音響学会 アコースティックイメージング研究会, 日本超音波医学会 基礎技術研究会共催
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	長谷川 英之 (Hasegawa Hideyuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------